

超重核融合中的靶核形变效应^{*}

刘祖华^{1,3;1)} 包景东^{1,2}

1(北京师范大学低能核物理研究所 北京 100875)

2(北京师范大学物理系 北京 100875)

3(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 利用额外推力模型研究了 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 俘获和融合过程中的靶核形变效应. 计算表明, 在近垒和垒下能区, 靶核形变使俘获截面和融合截面增强, 形成的复合核自旋分布展宽.

关键词 超重核 额外推力模型 融合截面 自旋分布

1 引言

超重元素合成是核物理研究领域的热点. 我国在超重核合成中已有了良好的开端, 合成了 $^{259}105$ ^[1]和 $^{265}107$. 超重核合成截面非常小, 相关实验难度极大. 最佳反应弹靶组合和反应激发函数的可靠理论计算对超重核合成实验具有指导意义. 众所周知, 弹核、靶核和形成的超重复合核的特性以及形成过程中的动力学等都会对超重核合成截面有影响. 从理论上对这些因素进行详细研究, 将为寻找新的超重核提供有益的启示. 本文将利用额外推力模型^[2]探讨超重核融合中的靶核形变效应.

20 世纪 80 年代起的重离子融合反应实验和理论研究发现并证实, 重离子近垒和垒下融合截面比一维位垒量子力学穿透模型预言显著增强^[3], 在垒下能区甚至增大 3 个数量级. 增强的原因在于入射道与碰撞核内部自由度的耦合, 造成融合位垒呈现一个分布, 因而降低了有效位垒. 这些内部自由度包括碰撞核的静态形变、转动和振动激发、核子转移以及脖子形成等. 对于静态形变, 例如靶核有四极形变 β_2 , 入射弹核对着靶核尖, 即靶核相对入射方向的角度 $\theta = 0^\circ$ 时, 入射道势垒明显降低, 因而入射弹核对着靶核尖时, 融合截面近似指数增大. 然而近几年的研究^[4,5]表明, 弹核对着靶核尖时准裂变几率比弹

核对着靶核腰($\theta = 90^\circ$)的准裂变几率大. 这一效应将使重核的融合截面减小. 上述两种是完全相反的效应. 因而超重核合成中的靶核形变效应将使截面增大还是减小, 是一个未知因素. 以下用 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 融合反应作为例子, 探讨这一效应, 其中 ^{238}U 有四极形变 $\beta_2 = 0.275$ ^[4].

2 额外推力与俘获截面

两重核碰撞过程中, 凡越过条件鞍点 (Businaro-Gallone 鞍点) 的事件为俘获事件. 条件鞍点定义为在质量不对称自由度冻结下, 其他自由度 (两核间距离, 脖子等) 都弛豫时的极值, 即相对于这些自由度变化的暂稳点. 进入条件鞍点后, 如系统继续演化而穿越无条件鞍点 (Bohr-Wheeler 鞍点) 形成球形或接近球形的复合核. 此类事件称为融合事件.

对于重反应系统俘获和融合过程都需克服摩擦力而作功, 因此除入射道的库仑位垒外, 还需额外推力才能越过条件鞍点和无条件鞍点. 而越过后者所需的超过库仑位垒的额外能量又称为额外-额外推力.

按 Swiatecki^[2]的标度规则, 额外推力可写成

$$E_x = E_{\text{ch}} \alpha^2 (x'_{\text{Bass}}(l) - x_{\text{th}})^2, \quad (1)$$

E_{ch} 是特征能量, α 是斜率系数, x_{th} 是有效可裂变参

2003-10-21 收稿

* 国家自然科学基金 (10235020, 10235030) 资助

1) E-mail: zhliu@iris.ciae.ac.cn

数阈值, x'_{Bass} 是 Bass^[6] 有效可裂变参数,

$$x'_{\text{Bass}}(l) = \frac{F_{\text{coul}} + F_{\text{cent}}}{(F_{\text{nucl}})_{\text{max}}}, \quad (2)$$

$F_{\text{coul}}, F_{\text{cent}}, (F_{\text{nucl}})_{\text{max}}$ 分别是最大核吸引力处的库仑力, 离心力和核力.

对于球形核^[7,8],

$$F_{\text{coul}} = Z_1 Z_2 e^2 / r_m^2, \quad (3)$$

$$F_{\text{cent}} = (fl)^2 \hbar^2 / (\mu r_m^3), \quad (4)$$

$$(F_{\text{nucl}})_{\text{max}} = 4\pi\gamma\bar{C}\phi_{\text{max}}, \quad (5)$$

$r_m = C_1 + C_2 + 0.3(\text{fm})$, C_1, C_2 是核半密度半径, $\bar{C} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$ 为约化半密度半径, $\mu = A_1 A_2 m_0 / (A_1 + A_2)$ 为系统约化质量, m_0 是核子质量, f 是角动量摩擦系数, (fl) 为剩余轨道运动角动量, ϕ 是亲近 (Proximity) 势函数, $\phi_{\text{max}} = 0.961$,

$$\gamma = 1.2496 \left[1 - 2.3 \left(\frac{N - Z}{A} \right)^2 \right] \text{ MeV/fm}^2, \quad (6)$$

由(2)式可得

$$x'_{\text{Bass}}(l) = x'_{\text{Bass}}(l = 0) + f^2 \left(\frac{l}{l_{\text{ch}}} \right)^2, \quad (7)$$

其中 l_{ch} 是特征角动量, 而 x'_{Bass} 是以核力为标度的无量纲库仑力. 额外推力模型中有 5 个参量, 其中 E_{ch} 和 l_{ch} 可用公式计算, a, f 和 x_{th} 由实验结果系统化分析确定或对原 Swiatecki 给定值作了调整^[7,8].

对于形变靶核, 按定义, 可得

$$x'_{\text{Bass}}(\theta, l = 0) = x'_{\text{Bass}}(l = 0) \left[1 + \left(\frac{81}{20\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{R_2}{r_m} \right)^2 \beta_2 P_2(\cos\theta) \right], \quad (8)$$

其中 R_1 是弹核半径, R_2 是靶核球形时半径, β_2 是靶核的四极形变, $r_m = C_1 + C_2(\theta = 0^\circ) + 0.3(\text{fm})$. 上式是按忽略脖子条件下靶核有形变的库仑力^[9] 推导而得. (8) 式只是一种近似表达式, 但与实验结果比较证明, 我们给出的靶核有形变时的额外推力比较合理. 对于 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$, 图 1 给出根据公式(1)和(8)计算的 $l = 0$ 时额外推力随靶核相对弹核入射方向的趋向角 θ 的变化. 由图可见, 额外推力随 θ 增大而迅速减小, 当 $\theta > 70^\circ$ 额外推力趋向消失.

对于形变靶核, 入射道的核势和库仑势分别为

$$V_{\text{N}}(r, \theta) =$$

$$-\frac{V_0}{1 + \exp \left\{ \left[r - R_1 - R_2 \left(1 + \sqrt{\frac{5}{4\pi}} \beta_2 P_2(\cos\theta) \right) \right] / a \right\}}, \quad (9)$$

其中 $V_0 = 16\pi\alpha\gamma\bar{C}$, $a = 0.67\text{fm}$ 为弥散参数;

$$V_{\text{C}}(r, \theta) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \left[1 + \left(\frac{9}{20\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{R_2}{r} \right)^2 \beta_2 P_2(\cos\theta) \right]. \quad (10)$$

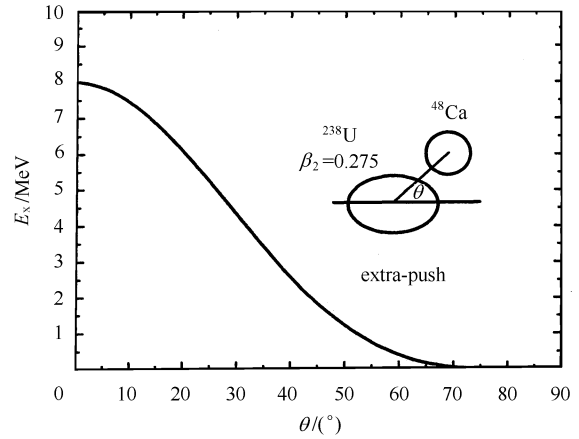


图 1 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 反应系统, 额外推力 E_x 随靶核趋向角 θ 的变化

弹核入射方向定义为 $\theta = 0^\circ$, 靶核 ^{238}U 具有四极形变 $\beta_2 = 0.275$.

俘获截面

$$\sigma_{\text{capt}} = \frac{\pi\hbar}{2\mu E_{\text{c.m.}}} \sum_l (2l + 1) T_{\text{capt}}(l), \quad (11)$$

$T_{\text{capt}}(l)$ 是 l 分波的俘获几率. $T_{\text{capt}}(l)$ 的计算基于 $[V_{\text{N}}(r, \theta) + V_{\text{C}}(r, \theta)]$ 和所需额外推力 $E_x(\theta, l)$. 图 2 的实线和虚线分别为 $\beta_2 = 0.275$ 和 $\beta_2 = 0.0$ 时 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 俘获截面, 空心圆点为实验值^[10]. 有四极形变时的计算值与实验结果较一致. 图 3 显示 $E_{\text{c.m.}} = 1.90\text{MeV}$ 时, 对于 $\beta_2 = 0.275$ 和 $\beta_2 = 0.0$ 的分波截面. 以上研究表明, 在垒下能区, 靶核形变使俘获截面增大, 自旋分布展宽.

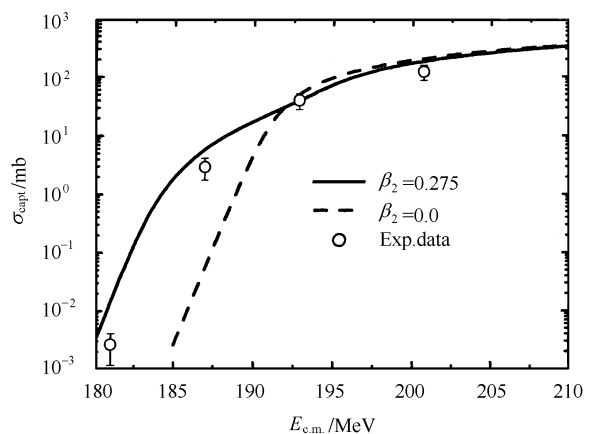
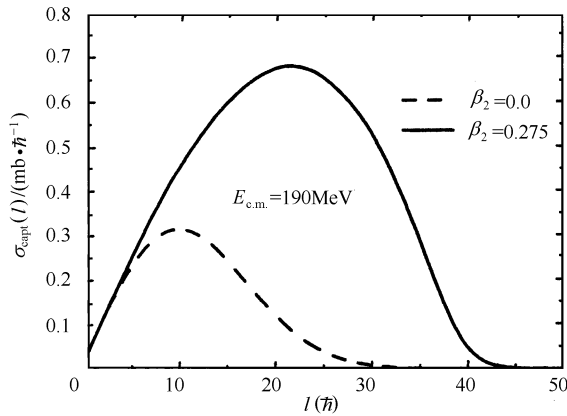


图 2 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 俘获截面

图 3 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 分波俘获截面

3 额外 - 额外推力与熔合截面

对于重的反应系统,俘获后还面临准裂变竞争.为了越过无条件鞍点,还需更大的推力,即额外 - 额外推力

$$E_{xx} = E_{ch} a^2 (x_m - x_{th})^2, \quad (12)$$

x_m 是由有效可裂变参数和复合核可裂变参数构成的标度参量.在我们的计算中, x_m 标度^[8]

$$x_m = (x'_{\text{Bass}})^{0.37} x^{0.63}, \quad (13)$$

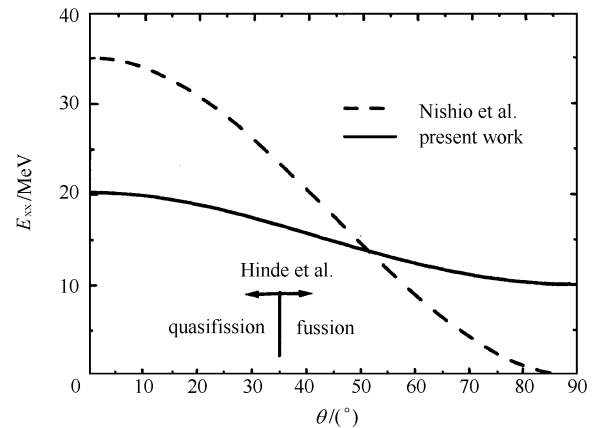
x'_{Bass} 为入射道的有效可裂变参数,是反应系统质量不对称冻结下的无量纲的库仑力,即以相应核力为标度的库仑力. x'_{Bass} 由 (8) 式计算. x 是复合核的可裂变参数.众所周知,库仑力的存在直接影响反应系统的稳定性,影响到准裂变与复合核形成过程的竞争,因而与额外推力直接相关.从俘获到越过无条件鞍点,系统的形状在不断变化.因此 x_m 本应是一连续函数.我们用入射道 x'_{Bass} 和复合核 x 的某种折中,即标度,来近似标征 x_m .

靶核有形变时的额外 - 额外推力目前有 3 种假设. Hinde 等人^[4] 在研究 $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ 裂变时发现需引入准裂变才能解释测得的碎片角分布.他们提出 $\theta < 35^\circ$ 时发生准裂变, $\theta \geq 35^\circ$ 为复合核裂变.他们的假设如图 4 的双向箭头所示. Nishio 等人^[11] 提出额外 - 额外推力

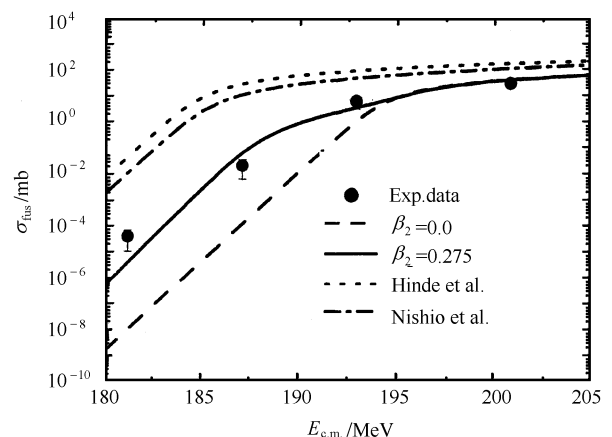
$$E_{xx}(\theta) = E_{xx}(0) \frac{r(\theta) - R_{\text{side}}}{R_{\text{tip}} - R_{\text{side}}}, \quad (14)$$

其中 $E_{xx}(0)$ 是球形时的额外 - 额外推力, $r(\theta)$ 是方向角为 θ 时的靶核半径, R_{tip} 和 R_{side} 分别为靶核尖方向和腰方向半径.图 4 中实线是我们提出的 $E_{xx}(\theta, l=0)$, 虚线是 Nishio 等人^[11] 假设的 $E_{xx}(\theta, l=0)$. 由图 4 可见,我们提出额外 - 额外推力与

Nishio 等人^[11] 提出额外 - 额外推力走向不同.

图 4 额外 - 额外推力 E_{xx} 的 3 种假设

熔合截面的计算使用与 (11) 式类似的公式,只是把公式中的 $T_{\text{capt}}(l)$ 换成 $T_{\text{fus}}(l)$. $T_{\text{fus}}(l) = T_{\text{capt}}(l) P_{\text{CN}}(l)$ 是 l 分波的熔合几率, $P_{\text{CN}}(l)$ 是 l 分波的复合核形成几率.利用额外 - 额外推力计算的 $\beta_2 = 0.275$ 和 $\beta_2 = 0.0$ 时的熔合截面如图 5 的实线和虚线所示.图中的实点是实验值^[10].实线、点虚线和虚线给出 3 种额外推力假设下计算的熔合截面的比较.点虚线是根据 (14) 式计算的结果,其值明显高于实验数据,尤其是在低能区域.点线是我们根据 Hinde 等人^[4] 的设想,以假定 $\theta < 73^\circ$ 为准裂变二种条件计算的熔合截面.两种假定下的计算结果都比较实验值高.由于弹核 ^{48}Ca 比 ^{16}O 重的多,因此对于 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 系统,临界角度 $> 35^\circ$.具体取值只能通过与实验结果比较后确定.看来 Hinde 等人关于形变靶核的额外 - 额外推力假设过于简单.就目前的情况而论,我们关于形变靶核的额外 - 额外推力假设比较合理.图 6 给出 $E_{c.m.} = 193\text{MeV}$ 时, $\beta_2 = 0.275$ 和 $\beta_2 = 0.0$ 的量子力学穿透模型计算的分波

图 5 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 熔合激发函数

熔合截面.可见,有靶核形变时,熔合截面增加,复合核的自旋分布明显展宽.

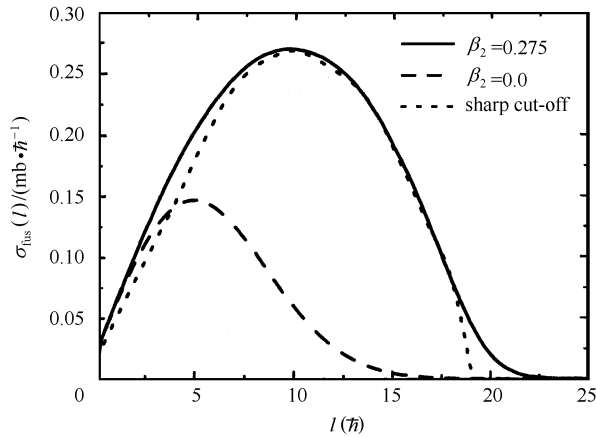


图 6 $E_{c.m.} = 193\text{MeV}$ 时 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 分波熔合截面

4 讨论与结论

由图 2 的俘获截面与图 5 的熔合截面的比较可

见,熔合截面比俘获截面低一个量级.因此,对于如 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 这样的重反应系统,准裂变占 90% 以上,熔合几率小于 10%.因此在超重核合成计算中,考虑准裂变的竞争非常重要.

额外推力是经典概念.为了考察将额外推力用于量子穿透公式是否合适,我们还作了锐截止模型计算.图 6 中的点线是锐截止模型计算的分波熔合截面,结果与实线所代表的量子穿透模型预言很接近.至于总的熔合截面,在我们感兴趣的能区二种模型计算值几乎完全一致.

我们对形变靶核时的额外-额外推力几种假设作了比较.从与实验结果比较看,提出的假设比较合理.

研究的结果表明,在近垒和垒下能区,靶核形变使俘获截面和熔合截面增强,自旋分布展宽,因而有利于超重核合成.然而,最终的结论还有待于复合核裂变计算.相关计算正在进行中.

参考文献 (References)

- 1 GAN Z G, QIN Z, FAN H M et al. Euro. Phys. J., 2001, **A10**:21
- 2 Swiatecki W J. Phys. Scripta, 1981, **24**:113
- 3 Dasgupta M, Hinde D J, Rowley N et al. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1998, **48**:401
- 4 Hinde D J, Dasgupta M, Leigh J R et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **74**:1295
- 5 Hinde D J, Dasgupta M, Leigh J R et al. Phys. Rev., 1996, **C53**:1290
- 6 Bass R. Nucl. Phys., 1974, **A231**:45
- 7 Toke J, Bock R, Dai G X et al. Nucl. Phys., 1985, **A440**:327
- 8 SHEN W Q, Albinski J, Gobbi A et al. Phys. Rev., 1987, **C36**:115
- 9 Alder K, Winther A. Nucl. Phys., 1969, **A132**:1
- 10 Itkis M G et al. Proceedings on Fusion Dynamics at the Extremes, Dubna, 2000. Edited by Oganessian Yu Ts, Egrebaev V I. Singapore: World Scientific, 2001. 93
- 11 Nishio K, Ikezoe H, Mitsuokas et al. Phys. Rev., 2000, **C62**:014602

Effects of Target Deformation on Superheavy Nuclei Fusion*

LIU Zu-Hua^{1,3;1)} BAO Jing-Dong^{1,2}

1(Key Laboratory of Beam Technology and Material Modification of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

2(Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

3(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract Effects of target deformation on the capture and fusion processes of the $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ system are investigated in the framework of extra-push model. The results of our investigation indicate that target deformation enhances the capture and fusion cross sections for heavy system forming superheavy nuclei, and broadens the spin distribution of the corresponding compound nuclei at near-and sub-barrier energies.

Key words superheavy nuclei, extra-push model, fusion cross section, spin distribution

Received 21 October 2003

* Supported by National Natural Science Foundation of China(10235020, 10235030)

1)E-mail: zhliu@iris.ciae.ac.cn